

전리방사선에 의한 직업성 암

성균관의대 강북삼성병원 직업환경의학과 교수 / 김수근



서론

어떤 물질과 상호작용할 때 이온화시킬 수 있는 충분한 에너지가 있는 방사선을 전리방사선(ionizing radiation)이라고 한다. 전리방사선에는 엑스(X)선, 감마(γ)선, 알파(α)선, 베타(β)선, 중성자선이 있다. 인체는 방사선이 투과할 때 방사선 에너지를 흡수하게 되며, 전리현상이 체내에서 일어난다. 이 과정에서 체내의 물이 분해되어 유리산소가 형성되고 DNA를 변화시켜 피폭된 세포(조직, 장기)에 일시적 또는 영구적 변화를 일으킨다. 방사선에 의한 암 발생은 확률적으로 발생하는 확률적 영향으로 설명하고 있다. 방사선 피폭으로 손상된 DNA가 사멸하지 않고 돌연변이를 일으킬 수 있다. 돌연변이 세포가 지속적으로 증식하면 암세포로 발전할 수 있다. 이와 같이 방사선 피폭 후에 돌연변이를 거쳐 신체에 영향이 나타나는 것은 확률의 법칙을 따르는 것으로 확률적 영향이라 한다.

전리방사선의 발암성은 히로시마 원폭 피해 생존자 및 체르노빌 사고 피해자 등을 대상으로 한 연구에서 입증되었고,^{1), 2), 3)} 국내에서도 원자력 발전소 근로자가 방사선에 피폭된 후 발생한 급성골수성백혈병이 업무상질병으로 인정되었다.⁴⁾ 그 후 몇 개의 사례가 근로복지공단과 법적 판결로 인정되었다.

최근에는 자연방사선 수준으로 노출된 경우에도 방사선발생장치가 있었다는 정도의 이유로 직업성 암이 인정된 사례들이 있었다.⁵⁾ 물론 다른 발암인자와 복합 노출되었을 가능성을 제시하고 있지만 다른 발암인자도 노출수준을 고려할 때에 작업환경노출수준의 100분의 1이하였다는 점을 고려하고, 표적 암이 다른 발암인자인 경우도 있다는 점 등을 고려한다면 복합노출로 인한 상가 작용에 대한 해석도 과도하였다고 할 수 있다.

방사선 위험을 경시하는 것도 문제이지만 역으로 과잉 인식하는 것도 병폐다. 체르노빌 사고 당시 실제 방사선 영향은 미미했던 서독이나 그리스 등 원거리 국가에서도 공포심 때문에 임신중절 건수가 가시적으로 증가했다. 후쿠시마 사고에서도 태아 위험수준과는 거리가 먼 피폭상황인데도 임신여성이 의사로부터 임신중절을 권유 받기도 했다. 더욱이 영향권 지역에서 먼저 도피하는 의사가 많았다는 보고가 있다. 방사선 위험에 대한 오해에 기인한다.⁵⁾

근로자가 암에 걸렸을 때에 전리방사선에 노출가능성이 있는 경우에도 업무관련성 판단에서 전리방사선에 의한 암 발생을 과도하게 오해해서 이루어지는 경우가 있다. 귀납적으로 정리된 발암인자에 대한 것을 개별 암환자 사례에 적용할 때에 전제된 상황을 고려하지 않고 연역적 추론방법으로 삼단논법을 단순하게 적용하여 판단하기 때문에 발생하는 것으로 보인다.

이에 전리방사선에 의한 직업성 암에 대한 고찰을 통해서 타당한 업무관련성 평가를 하는 데에 도움이 되고 한다.

전리방사선에 의한 암종

방사선이 어떠한 과정으로 암을 유발하는가는 잘 알려져 있지 않으며, 방사선에 의한 암과 다른 요인에 의한 암을 구별할 수도 없다. 현재까지 알려진 방사선에 의한 암 유발 과정에 대한 가설은 방사선에 의해 염색체가 손상을 받고 그 세포가 비정상적인 성장과정을 거치면서 암이 발생하게 된다는 가설이 가장 일반적인 것이다. 이외에도 방사선이 세포에 장해를 일으킬 수 있는 바이러스에 대한 인체의 저항력을 약화시킴으로 암이 발생하게 된다가나 체내에 존재하면서 정상세포에 심각한 영향을 유발하는 바이러스를 방사선이 활성화시켜서 급속히 증식하게 됨으로써 암이 발생한다는 가설이 있다.

전리방사선에 의해서 발생할 수 있는 암은 만성림프구성백혈병, 흑색종, 호지킨 림프종, 악성종괴종 등 일부를 제외⁶⁾하고 거의 모든 암이 발생한다는 것으로 받아들여지고 있다. 2013년 7월 1일부터 적용되는 산업재해보상보험법 시행령에서는 전리방사선에 노출되어 발생한 침샘암, 식도암, 위암, 대장암, 폐암, 뼈암, 피부의 기저세포암, 유방암, 신장암, 방광암, 뇌 및 중추신경계암, 갑상선암, 급성 림프구성 백혈병 및 급성·만성 골수성 백혈병 등 15종의 암종을 제시하고 있다. 한편, 직업성 암으로 원자력안전위원회의 고시와 미국 에너지부와 노동부에서 핵무기 및 원자력 발전관련 종사자들의 암에 대한 보상을 위한 법에서 제시되고 있는 것을 보면 다음 <표 1>과 같다. 일본에서는 백혈병, 폐암, 피부암, 골육종, 갑상선암, 다발성골수종 및 비호지킨 림프종을 제시하고 있다.

<표 1> 직업성 암으로 제시된 암종

산업재해보상보험법 시행령	원자력안전위원회 고시	미국(EEOICPA) ⁶⁾
갑상선암	갑상선암	Thyroid cancer
유방암	여성유방암	Breast cancer
	난소암	Ovarian cancer
뇌 및 중추신경계암	뇌암	Cancer of the brain & central nervous system
침샘암	타액선암	Cancer of the salivary gland
식도암	식도암	Cancer of the esophagus
위암	위암	Stomach cancer
		Cancer of the small intestine
대장암	대장암	Colon cancer/Rectal cancer
	간암	Primary liver cancer
		Bile duct / gall bladder cancer
	췌장암	Cancer of the pancreas
방광암	방광암	Cancer of the urinary tract (kidney & bladder)
신장암	신장암	Cancer of the urinary tract (kidney & bladder)
폐암	폐암	Lung cancer
		Cancer of the pharynx/ Laryngeal cancer
피부의 기저세포암	피부암	Multiple skin cancers
급성 림프구성 백혈병	백혈병	Leukemia, including CLL
급성 골수성병 백혈병		
만성 골수성병 백혈병		
	비호지킨스림프종	Lymphomas (except Hodgkin's)
	다발성골수종	Multiple Myeloma
뼈암		Bone cancer

한편 IARC에서는 역학적인 근거가 충분한 전리방사선에 의한 암종은 침샘암(salivary gland), 식도암(oesophagus), 위암(stomach), 결장암(colon), 폐암(lung), 뼈암(bone), 피부 기저세포암(basal cell of the skin), 여성유방암(female breast), 신장암(kidney), 방광암(urinary bladder), 뇌암과 중추신경계암(brain and CNS), 갑상선암(thyroid) 및 백혈병(만성림프구성 백혈병은 제외)등을 전리방사선에 의한 충분한 근거가 있는 암종으로 제시하였다. 그리고 양성의 연관성(positive associations)이 있는 암으로 직장암(rectum), 간암(liver), 췌장암(pancreas), 난소암(ovary), 전립선암(prostate), 비호지킨 림프종(non-Hodgkin lymphoma) 및 다발성 골수종(multiple myeloma)을 제시하고 있다.⁶⁾ 우리나라의 현행 직업성 암 인정기준에 그대로 반영되어 있다.

직업적 피폭과 역학연구

직업적 피폭

전리방사선의 직업적 피폭은 의료시설, 광산, 공장, 비행 승무, 핵발전소 및 핵무기와 관련하여 일하는 근로자들에게서 일어난다. 핵관련 근로자들로부터 나온 복합적인 연구 데이터들은 소량의 저선량 방사선의 건강영향을 더 민감하게 분석할 수 있게 해준다. 또한 장기간에 걸친 저선량 방사선 피폭의 효과를 직접 분석할 수 있게 해주기도 한다. 그러나 이러한 복합적인 연구의 민감성이 증가하더라도 저선량 방사선의 위험은 현재의 방사선 허용치보다 적은 양부터 두 배의 양 사이의 범위 내에 있다는 것에 주목해야 한다. 직업적 전리방사선의 연간 평균 피폭선량은 <표 2>에 제시하였다.⁷⁾

직업별 피폭선량은 1975~79년에 1.9 mSv에서 1990~94년의 0.6 mSv로 감소하였다.⁸⁾ 미국에서 의료분야 방사선작업종사자의 피폭이 1940년 이전에는 연간 100 mSv에서 1977~84년 2.3 mSv로 감소하였다.¹¹⁾ 전 세계적으로 1980~84년에 연간 평균 피폭량이 0.6 mSv에서 1990~94년에는 0.33 mSv로 감소하였다.⁹⁾

<표 2> 직업적인 전리방사선 피폭

Source/practice	Number of monitored workers(thousands)	Average annual effective dose(mSv)
Man-made sources		
Nuclear fuel cycle(incl. uranium mining)	800	1.8
Industrial uses of radiation	700	0.5
Defence activities	420	0.2
Medical uses of radiation	2,320	0.3
Education/veterinary	360	0.1
Enhanced natural sources		
Air travel (crew)	250	3.0
Mining (other than coal)	760	2.7
Coal mining	3,910	0.7
Mineral processing	300	1.0
Above-ground workplaces (radon)	1,250	4.8

출처 : UNSCEAR(10)

직업군에 대한 역학연구

IARC는 2007년에 15개국의 1년 이상 원전종사자 407,391명을 대상으로 암 위험에 대한 연구를 하였다.⁹⁾ 이 연구대상자들의 평균누적선량은 19.4 mSv이었고, 피폭선량자료에 문제가 있었던 캐나다를 제외한 대상자들의 초과상대위험(ERR/Sv)은 0.58(90% CI: -0.1~1.39)로 선량과 암 위험에서 양의 관계(positive association)였지만 통계적으로 유의하지 않았다. 만성 림프구성 백혈병(PLL)을 제외한 백혈병의 ERR/Sv도 1.93(90%CI: <0~7.14)으로 통계적으로 유의하지 않았다. 31개의 개별 암에 대한 선량-반응에서 통계적으로 유의한 관계는 폐암에서 ERR/Sv이 1.86(90% CI: 0.49~3.63)이었다.

국내에서 79,679명의 방사선 작업자를 대상으로 1992~2004년의 추적기간에 대한 연구에서 평균누적유효선량은 6.1 mSv이었고, 표준화사망률(SMR)은 모든 암에 대한 SMR은 0.73(95% CI: 0.64~0.82)이었고, 백혈병에 대한 SMR은 0.59(95%CI: 0.28~1.06)로 강한 건강근로자효과를 보였다. 모든 암에 대한 사망과 이환의 초과상대위험도는 각각 7.2(90% CI: -5~21), 2.6(90% CI: -4~10)이었고, 백혈병의 경우 각각 16.8(90%CI: -34~149), 15.8(90%CI: -31~108)로 선량과 암 위험 관계가 통계적으로 유의하지 않았다.¹⁰⁾

원전종사자들 17,648명을 대상으로 1992~2005년의 추적기간 동안 연구에서 대상자의 평균누적피폭량은 19.86 mSv이었고, 여성을 제외한 16,236명에 대하여 피폭선량이 없는 그룹과 방사선작업자로 구분하여 일반인구와 비교하였다. 백혈병을 제외한 모든 암에서 표준화발생률(SIR)은 각각 1.06(95%CI: 0.86~1.29), 0.86(95%CI: 0.7~1.05)이었고, 백혈병에 대한 SIR은 1.34(95%CI: 0.27~3.92), 1.49(95% CI: 0.3~4.36)로 원전종사자들의 암 발생률이 통계적으로 유의하게 높지 않았다. 단, 갑상선암의 경우 방사선 작업자의 SIR이 5.93(95%CI: 2.84~10.9), 비방사선작업자의 SIR이 5.20(95%CI: 2.24~10.2)로 두 그룹 모두 일반 인구에 비해서 높은 발생률을 보였으나, 두 그룹 간에는 차이가 없었다. 두 그룹 간에 SIR의 차이를 보인 경우는 방사선작업자의 폐암으로 상대위험도(RR)는 3.48(95%CI: 1.19~11.48)로 비방사선작업자에 비해서 높았다. 방사선 작업자의 백혈병을 제외한 모든 암의 초과상대위험도는 2.06(95%CI: -1.91~9.0)이었고, 백혈병은 3명으로 사례 수가 적어 초과상대위험도가 계산되지 않았다.¹¹⁾

영국 방사선 작업종사자 대한 연구에서도 암 발생 및 사망과의 관계는 상기 연구결과와 유사한 경향을 보였다.¹²⁾ 미국 원전종사자 53,698명에 대하여 1979~1997년의 추적기간 동안 연구에서 평균누적유효선량은 25.7 mSv이었고, 고형암에 대한 SMR은 0.65(95%CI: 0.59~0.72), 백혈병은 1.07(95% CI: 0.71~1.53)로 일반인구보다 통계적으로 유의하게 사망률이 높지 않았다. 고형암의 초과상대위험도(ERR/Sv)는 0.51(95% CI: -2.01~4.64), CLL을 제외한 백혈병의 ERR/Sv는 5.67(95%CI: -2.56~30.4)로 통계적으로 유의하지 않았다.¹³⁾

미국의 핵무기산업 근로자들로 사바나 리버 사이트(Savannah River Site)에 고용된 근로자들의

백혈병 사망률과 선량관계는 3년의 지연기간을 가정하였을 때 초과상대위험도가 4(90%CI: $\langle 0 \sim 12 \rangle$)로 양의 관계를 보였다. CLL을 제외한 백혈병의 ERR/Sv는 8(90% CI: 1~20), 골수성백혈병의 ERR/Sv는 12(90%CI: 2~35)로 강한 양의 관계를 보였고, 선량-반응관계는 피폭된 후의 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 보였다.¹⁴⁾ 5년과 10년의 지연기간을 가질 때 방사선량과 림프종 사망의 ERR/Sv는 각각 6.99(90% CI: 0.96~18.39), 8.18(90% CI:1.44~21.16)로 양의 관계를 보였다.¹⁵⁾

미국의 4개의 핵무기 시설과 미해군 조선소 근로자들을 대상으로 한 백혈병 사례-대조군 연구에서 ERR/Sv는 1.44(90%CI: $\langle -1.03 \sim 7.59 \rangle$)로 선량과 양의 상관관계가 있었다.¹⁶⁾ 핵을 동력으로 하는 배의 정비사를 포함한 조선소 근로자들의 백혈병, 림프조혈암, 폐암과 중피종에 대한 사망률과 선량의 관계를 분석한 결과 백혈병과 폐암, 림프조혈암은 양의 선량-반응 관계를 보였고, 피폭선량이 50 mSv와 5.0~9.9 mSv인 근로자들의 비교분석 결과 백혈병에 대한 상대위험도(RR)는 2.41(95%CI : 0.5~23.8), 폐암은 1.26(95%CI: 0.9~1.9), 림프조혈암은 2.94(95%CI: 1.0~12.0)이었다.¹⁷⁾

캐나다 원전종사자 연구는 평균누적유효선량이 21.64 mSv인 45,316명을 대상으로 하였다. 고형암의 SMR은 0.72(95% CI: 0.66~0.78), 모든 백혈병의 SMR은 0.83(95%CI: 0.52~1.27), CLL을 제외한 백혈병의 SMR은 0.78(95% CI:0.45~1.25), 비호즈킨 림프종의 SMR은 0.66(95% CI: 0.38~1.06)이었다. 고형암의 초과상대위험도(ERR/Sv)는 1.77(95% CI: -0.42~5.3), 결장암은 6.99(95%CI: $\langle -1.47 \sim 64.2 \rangle$), 폐암은 3.13(95%CI: -0.45~10.4), CLL을 제외한 백혈병은 9.79(95%CI:$\langle -1.49 \sim 107 \rangle$))로 선량-반응 관계가 유의하지 않았다.¹⁸⁾

러시아의 마약 핵 시설 근로자들은 방사선 화학물질과 플루토늄 생산시설 근로자들로 플루토늄 노출의 가능성을 유의하게 가지고 있다. 1948~1997년의 추적기간 동안 총 21,557명의 마약 핵 시설 근로자들의 암 사망에 대한 연구결과 810 mGy의 평균누적선량이었다. 고형암에 대한 초과상대위험도 ERR/Gy는 0.15(90% CI: 0.09~0.2)로 통계적으로 유의하였고, CLL을 제외한 백혈병의 ERR/Gy는 1(90%CI: 0.5~2)로 통계적으로 유의하지 않았다.¹⁹⁾ 폐, 간, 골암을 제외한 고형암의 발병률에 대한 연구가 1948~2004년의 추적기간 동안 총 22,366명의 근로자들을 대상으로 실시한 연구에서 평균누적선량은 510 mGy이었고, 고형암의 ERR/Sv는 0.07(95% CI: 0.01~0.15)로 앞의 연구와 유사하였다. 16개의 암 부위에 대해서는 구강암에서만 ERR/Sv가 1.74(95% CI: 0.37~6.71)로 통계적으로 유의하였다.²⁰⁾ 1955~2000년 기간 동안에 21,790명의 마약 근로자들의 평균누적외부선량은 800 mGy이었고, 폐암의 ERR/Gy는 남성은 0.17(95%CI: 0.05~0.32), 여성은 0.32(95%CI: $\langle 0 \sim 1.3 \rangle$)이었다.²¹⁾

체르노빌 폐기청소 근로자(liquidators)들의 백혈병과 림프종 발병률의 사례-대조군 연구에서 70명의 사례(40:백혈병, 20:비 호지킨 림프종, 10:기타)와 287명의 코호트 내에서 연령을 맞추어 대조군으로 하였다. 전체 ERR/Gy는 6.0(90%CI: -0.2~23.5). 비호지킨 림프종은 28.1(90% CI: 0.9~243), 백혈병은

4.8(90%CI: <0~33.1)이었다. 사례수가 19명이고 대조군이 83명인 CLL을 제외한 백혈병에 대한 ERR/Gy는 5.0(90%CI: -0.38~5.7)이고, 만성림프성백혈병(CLL)의 ERR/Gy는 4.7(90%CI: -∞~76.1)이었다.²²⁾ 1986~2000년까지 백혈병으로 진단된 71명과 501명의 연령과 거주지를 일치시킨 대조군을 사용한 체르노빌 청소 작업자들의 백혈병에 대한 사례-대조군 연구에서 전체 백혈병에 대한 ERR/Gy는 3.44(95%CI: 0.47~9.78)이었고, 만성과 비만성 림프성 백혈병의 ERR/Gy는 각각 4.09(95%CI: <0,14~41), 2.73(95% CI: <0~13.50)이었다.²³⁾ 러시아의 폐기청소작업자에 대한 1991~1998년의 모든 암으로 인한 사망의 ERR/Gy는 2.11(95%CI: 1.31~2.92)이었고, 1991~2001년의 고형암은 0.34(95%CI: -0.39~1.22)로 양의 관계이지만 통계적으로 유의하지 않았다.²⁴⁾

업무관련성 평가를 위한 피폭수준

전리방사선에 의한 암 발생은 확률적 영향의 결과이다. 전리방사선이 세포 DNA에 손상을 주어 여전히 재생능력이 있는 세포의 변이를 초래하여 일어난다. 이러한 변이는 악성으로 될 수도 있다. 이러한 영향의 발생확률은 전리방사선에 노출되는 수준에서는 선량에 비례하여 증가할 것으로 본다. 암 유발 확률의 증가는 피폭 당시 연령, 성별, 암에 대한 유전적 취약성 등의 영향을 받는다.²⁵⁾

1990년 이후 방사선 종양형성에 관한 세포 및 동물실험 데이터가 축적됨에 따라, 개별 세포에서 DNA손상 반응 과정이 방사선 피폭 후 암 발생에 극히 중요하다는 것이 확인되고 있다. 이러한 성과는 방사선 방호 목적에서 약 100 mSv 미만의 낮은 선량 범위에서 암 발생이 해당 장기나 조직의 등가선량 증가와 정비례로 증가한다고 가정하는 것이 과학적으로 그럴듯하다는 것을 지지한다는 것이 국제방사선방어위원회(ICRP)의 판단이다.²⁶⁾ 따라서 ICRP가 권고하는 방사선 방호의 현실적 체계는 약 100 mSv 미만 선량에서 선량이 증가하면 방사선에 의한 암의 발생확률도 정비례로 증가한다는 가정에 기초하고 있다.

그러나 이러한 이론이 근로자가 암에 걸렸을 경우에 전리방사선에 의한 것인지를 판단하는 데에 그대로 적용될 수는 없다. 왜냐하면 근로자의 암은 그가 속한 집단에서 자연적 발생확률도 높기 때문이다. 이에 업무관련성 평가에서는 비례균형의 원칙을 적용하여 자연적 발생확률보다 전리방사선으로 인한 발생확률이 높을 때에 업무관련성이 있다고 판단하게 된다. 따라서 어느 정도의 전리방사선에 피폭되었을 때에 직업성 암이라고 할 것인가가 중요한 쟁점이 된다. 이러한 피폭수준을 정확하게 제시할 수 있을 정도의 양-반응관계에 관한 연구도 부족할 뿐만 아니라 환자의 처음 피폭시 연령, 성 및 진단 시의 연령 등에 따라서 이 피폭수준은 달라지기 때문에 하나로 제시할 수는 없다. 다만, 기존의 연구에서 전리방사선으로 인하여 발생할 확률이 자연적으로 발생하였을 확률보다 높아지는 피폭수준의 대략적인

정리는 필요하다.

방사선 피폭 후 장기별 암 위험에 관한 역학적 정보의 대부분은 1945년 일본 원폭생존자에 대한 지속적인 추적연구, 즉 수명연구(Life Span Study, LSS)에서 나온 것이다. 전체적으로 LSS로부터 유도된 인체 발암 위험도는 1 Sv 당 전체인구집단에서는 100명당 5.5명이 추가 발생하고 방사선 작업종사자에서는 4.1명이 발생하는 것으로 산출하였다.²⁷⁾ 이 결과는 전체 암에 대한 명목위험계수이고, 개별 장기나 조직에 대해서는 다른 선량-선량률 효과가 적용될 수 있다.

0.2 Gy에서 5 Gy 및 신체의 국소적인 피폭으로 인하여 암이 발생한다는 사실은 역학적인 연구결과를 통해서 잘 알고 있다. 이러한 연구는 주로 방사선을 이용하여 치료를 받은 사람들을 대상으로 한 연구들이나 우라늄 광산의 근로자들, 나가사키와 히로시마의 원폭생존자들을 대상으로 한 역학연구들이다.

14차 일본 원폭생존자 사망률 연구보고서(추적기간 1950~2003년, 전체 연구대상 수 86,661명 중 58% 사망)에 따르면, 0~0.2 Gy구간에서의 고형암 위험도(ERR/Gy=0.56, 95% CI: 0.15~1.04)의 유의성이 보고되었다. 하지만, 피폭군들의 지리적, 사회-인구학적 요인에 따른 기저 암 위험도의 차이로 인해 명확한 결론을 도출하지 못했으며, 0.2 Gy보다 더 낮은 저선량 선량구간에 대해서는 유의성이 관찰되지 않았다.²⁶⁾ 한편, 방사선을 이용한 치료자들을 대상으로 한 연구에서는 약 100 밀리시버트(mSv) 이하 방사선량이 실제로 암을 증가시키지는 판단할 수 없었다고 한다.²⁸⁾ 자궁내 피폭(임신 중 태아가 피폭된 경우)의 경우에는 10 mSv의 소량 피폭 때도 초과 암이 발견되었다.²⁹⁾ 평생위험성모델은 0.1 Sv 이상의 양의 방사선에 피폭될 경우, 대략 100명 중 1명꼴로 암(고형암 또는 백혈병)이 발생할 것을 예견하고 있다. 피폭량이 적을수록 그에 비례해서 위험성은 더 낮아진다. 예를 들면, 0.01 Sv에 노출되었을 경우 암에 걸릴 확률은 대략 1,000명 중 한명이라고 예견하고 있다.³⁰⁾

결론

100 mSv 이상의 고 선량 영역에서의 방사선 위험은 선량이 증가함에 따라 선형적으로 비례하여 증가한다는 과학적 근거가 있으므로, 이를 확대하여 100 mSv보다 낮은 선량에서도 그 선량에 비례하는 정도의 위험이 있는 것으로 가정하는 '문턱 없는 선형비례 모델(LNT 모델)'을 채택하고 있으나 이것은 증명되지 않은 가설일 뿐이다. 업무상 질병 여부를 판단하는 데에 이 이론을 적용할 수는 없다. 방사선은 여러 가지 발암인자 중 하나일 뿐이므로 방사선작업이 반드시 암을 일으킨다고 단정할 수는 없다. 모든 사람이 매일 방사선과 연관된 환경에서 생활하지만 모든 사람이 다 암에 걸리는 것은 아니다. 설령 아주 낮은 준위의 방사선을 피폭으로 체세포 및 생식세포의 변이가 발생했다 할지라도 대부분의 경우에는 인체의 복구체계에 의해 손상부분은 쉽게 복구가 된다.

높은 선량을 받은 원폭생존자의 역학조사의 경우에도 암발생률이 약간 증가했을 뿐이며 이는 고선량을 피폭한 개인들의 경우 또는 선량한도를 초과하여 피폭된 경우에도 마찬가지였다. 약 100 mSv에서 4,000 mSv까지의 수준(연평균 자연방사선량의 약 40에서 1600배에 해당하는)에 노출된 일본 원자폭탄 생존자에게서 초과 암이 발견되었다. 피폭량이 증가할수록 암 발생도 증가하며 자연적인 암 발생확률보다 전리방사선에 의한 암 발생확률이 보다 높아지는 대략적인 피폭량은 100 mSv 이상부터라는 것이 역학연구의 결과이다. ☺

각주

- ① <http://www.yonhapnews.co.kr/society/2014/08/21/0702000000AKR20140821114051004.HTML> 암 발생에 대하여 “벤젠과 전리방사선 같은 유해물질에 노출됐을 개연성이 있다”는 것을 근거로 하여 직업성 암이라고 판단한 사례이다.
- ② http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201303202118525&code=940702 전리방사선(X선)과 비소 등 발암물질에 노출될 가능성이 크다는 이유를 들어서 직업성 암으로 인정하였다.
- ③ 전리방사선에 의하여 발생하는 않는 암이라고 단정할 수 있는 근거는 역학적 연구에서 일관되게 암 발생이 증가하지 않기 때문이다.
- ④ <http://cph.uiowa.edu/iowafwp/ames/EEOICPA.html>
- ⑤ 방사선방호의 현실적 체계에는 이러한 판단이 과학적으로 무난하지만, 이를 뒷받침하는 생물학적, 역학적 정보는 없다는 것이 ICRP의 관점이다.

참고문헌

1. Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, Kamada N, Dohy H, Matsuo T, Nonaka H, Thompson DE, Soda M, Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950 ~ 1987. *Radiat Res* 1994; 137: S68 ~ S97.
2. Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950 ~ 1990. *Radiat Res* 1996; 146: 1 ~ 27.
3. Moysich KB, Menezes RJ, Michalek AM. Chernobyl-related ionising radiation exposure and cancer risk: an epidemiological review. *Lancet Oncol* 2002; 3: 269 ~ 279.
4. Lim HS, Cheong HK, Kim SK, Park BC, Lee K. A case of acute myelogenous leukemia occurring in a nuclear power plant worker. *Dongguk J Med* 2002; 9: 122 ~ 138.
5. 이재기(역자). 진단 및 중재 절차를 위한 방사선방호 교육훈련. ICRP 간행물 113(Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures). 대한방사선방어학회. http://www.karp.or.kr/6s_4.html
6. IARC (2012). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Radiation. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum, 100D: 210
7. UNSCEAR; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000a). Sources and effects of ionizing radiation: Volume 1 : Sources. New York: United Nations, 1 ~ 649
8. Simon SL, Weinstock RM, Doody MM et al. (2006). Estimating historical radiation doses to a cohort of U.S. radiologic technologists. *Radiat Res*, 166: 174-92.
9. Cardis E, Vrijheid M, Blettner M et al. (2007). The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risks. *Radiat Res*, 167: 396-416.
10. YS Ahn, RM Park, DH Koh. Cancer Admission and Mortality in Workers Exposed to Ionizing Radiation in Korea. *JOEM*. 50.791~801(2008)
11. MS Jeong, YW Jin, KH Yang, YO Ahn, CY Cha. Radiation exposure and cancer incidence in a cohort of nuclear power industry workers in the Republic of Korea, 1992 ~ 2005. *Radiat Environ Biophys*. 49.47 ~ 55(2010)
12. Muirhead CR, O'Hagan JA, Haylock RG et al. (2009). Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *Br J Cancer*, 100: 206-12.

13. Howe GR, Zablotska LB, Fix JJ, Egel J, Buchanan J. Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. *Radiat Res.* 2004 Nov;162(5):517~26.
14. Richardson DB, Wing S (2007). Leukemia mortality among workers at the Savannah River Site. *Am J Epidemiol*, 166: 1015~1022.
15. Richardson DB, Sugiyama H, Wing S et al. (2009). Positive associations between ionizing radiation and lymphoma mortality among men. *Am J Epidemiol*, 169: 969-976.
16. Schubauer-Berigan MK, Daniels RD, Fleming DA et al.(2007). Risk of chronic myeloid and acute leukemia mortality after exposure to ionizing radiation among workers at four U.S. nuclear weapons facilities and a nuclear naval shipyard. *Radiat Res*, 167: 222-232.
17. Matanoski GM, Tonascia JA, Correa-Villaseñor A et al.(2008). Cancer risks and low-level radiation in U.S. shipyard workers. *J Radiat Res (Tokyo)*, 49: 83-91.
18. Zablotska LB, Lane RS, Thompson PA. A reanalysis of cancer mortality in Canadian nuclear workers (1956~1994) based on revised exposure and cohort data. *Br J Cancer.* 2014 Jan 7;110(1):214~23.
19. Shilnikova NS, Preston DL, Ron E et al. (2003). Cancer mortality risk among workers at the Mayak nuclear complex. *Radiat Res*, 159: 787-798.
20. Hunter N, Kuznetsova IS, Labutina EV, Harrison JD. Solid cancer incidence other than lung, liver and bone in Mayak workers: 1948~2004. *Br J Cancer.* 2013 Oct 1;109(7):1989~96.
21. Gilbert ES, Koshurnikova NA, Sokolnikov ME et al. (2004). Lung cancer in Mayak workers. *Radiat Res*, 162: 505-516.
22. Kesminiene A, Evrard AS, Ivanov VK et al. (2008). Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators. *Radiat Res*, 170: 721-735.
23. Romanenko AY, Finch SC, Hatch M et al. (2008). The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res*, 170: 711-720.
24. Ivanov VK (2007). Late cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia. *Health Phys*;93: 470-479.
25. ICRP, 2007. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. *Ann. ICRP* 37(6).
26. ICRP; International Commission on Radiological Protection (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103.
27. 방사선방어학회. ICRP 103 - 방사선의 인체위해도 변화. 2009. <http://www.karp.or.kr/6s.4.html>
28. Committee 1 Task Group Report Low-dose Extrapolation of Radiation - Related Cancer Risk. 12/421/04(Draft ofDraft of December 10, 2004) http://www.icrp.org/docs/low-dose_tg_rept_for_web.pdf
29. Doll, R., and R. Wakeford. 1997. Risk of Childhood cancer from foetal irradiation. *Brit J. Radiol* 70: 130~139.
30. National Research Council (US); Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII phase 2. Washington DC: National Academies Press; 2006.